

## 지리정보시스템을 활용한 서울시 유해대기오염물질 우선순위 측정지역 선정

### Selection of Priority Monitoring Areas for Hazardous Air Pollutants (HAPs) in Seoul using Geographic Information System

김성준 · 박현진 · 이상진 · 김창혁<sup>1)</sup> · 이승복<sup>1)</sup> · 최성득\*  
울산과학기술원 도시환경공학부, <sup>1)</sup>한국과학기술연구원 환경복지연구단  
(2017년 12월 29일 접수, 2018년 2월 6일 수정, 2018년 2월 20일 채택)

Seong-Joon Kim, Hyeon-Jin Park, Sang-Jin Lee, Chang-Hyeok Kim<sup>1)</sup>,  
Seung-Bok Lee<sup>1)</sup> and Sung-Deuk Choi\*

*School of Urban and Environmental Engineering,  
Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)*

<sup>1)</sup>*Center for Environment, Health and Welfare Research,  
Korea Institute of Science and Technology (KIST)*

(Received 29 December 2017, revised 6 February 2018, accepted 20 February 2018)

#### Abstract

As the Seoul metropolitan city has the largest numbers of population and vehicles, the citizens can be exposed to hazardous air pollutants (HAPs) mainly from the vehicular exhaust and human activities. In this study, we proposed a systematic method for the selection of priority monitoring areas for HAPs using Geographic Information System (GIS). First, emission parameters (emission data, vehicle registration, monitoring data, and so on) and population parameters (population and population density) were plotted using the inverse distance weighted (IDW) interpolation. Then, the interpolation data for individual parameters, which were normalized between 1 and 5 points, were compiled for 270 grids with a resolution of 2 km × 2 km. The total score of each grid was calculated using weights (1~5) for the individual parameters. The final ranking of each grid was assigned by four scenarios with varying fractions of the emission and population parameters from 50 : 50 to 80 : 20. Consequently, nine grids were suggested as priority monitoring areas, and all of them are located in the southwestern part of Seoul.

**Key words** : Grid, GIS, Passive air sampling, PAHs, VOCs

#### 1. 서 론

최근 국내에서는 빈번한 고농도 미세먼지 오염과 화

학사고 등으로 인해서 그 어느 때보다 대기환경에 관한 관심이 높은 상황이다(Kim *et al.*, 2016). 미세먼지의 유해성은 유해물질을 포함한 화학조성에서 기인하므로, 최근의 대기환경문제를 해결하기 위해서는 화학물질 관리 차원의 저감대책을 고려해야 한다. 미국 환

\*Corresponding author.  
Tel : +82-(0)52-217-2811, E-mail : sdchoi@unist.ac.kr

경청 (United States Environmental Protection Agency: US EPA)은 187종 화학물을 유해대기오염물질 (Hazardous Air Pollutants: HAPs)로 지정하여 관리하고 있으며 (US EPA, 2017), 우리나라 환경부는 특정대기오염물질 (저농도에서도 장기적인 섭취나 노출에 의하여 사람의 건강이나 동식물의 생육에 직접 또는 간접으로 위해를 끼칠 수 있어 대기 배출에 대한 관리가 필요하다고 인정된 물질) 35종을 지정하였다. 그러나 이 외에 상업적인 용도로 합성되어 대기 중으로 배출되거나 비의도적으로 생성되는 화학물질과 이들 물질의 반응산물까지 고려하면, 국내·외에서 관리되는 HAPs 개수는 매우 적다.

대기오염물질을 관리하기 위해서는 가장 기본적으로 시공간적인 오염 현황을 파악해야 한다. 이를 위해 환경부는 다양한 측정망을 운영하고 있는데, HAPs와 관련해서는 유해대기물질측정망(국가 운영, 전국 32개소)과 대기중금속측정망(지자체 운영, 전국 54개소)을 운영하고 있으며, 전국 6개 권역에 대기오염집중측정소를 설치하여 미세먼지 중 중금속을 자동측정한다 (MOE, 2016). 그러나 대도시의 인구와 면적을 고려할 때, 측정소 개수가 절대적으로 부족하다. 예를 들어, 서울시에는 세 지점(강남구, 광진구, 서울역)에만 유해대기물질측정소가 설치되어 있다.

환경부는 제2차 대기환경개선 종합계획 (2016~2025)에 근거하여, 2025년까지 유해대기물질측정소를 100개로 확충할 예정이다. 이러한 측정소 확충을 위해서는 기존 측정소 선정의 타당성을 검증하고 (Lee *et al.*, 2010), 지리정보시스템 (Geographic Information System: GIS) (Yoo and Park, 2007; Woo *et al.*, 2005)을 활용하여 객관적인 자료에 근거한 우선순위 모니터링 지역을 도출하고, 최종적으로 현장방문을 통해 적절한 측정지점을 선정해야 한다. 그러나 측정지점 선정을 위한 세부적인 절차가 마련되지 않았고, 객관적인 자료 활용에 대한 지침이 없으므로, 해당 지역 전문가와 공무원의 주관적 판단이 개입될 소지가 크다. 측정망 운영과는 별도로, 국립환경과학원은 2005년부터 전국 주요 산업단지에서 HAPs 집중 모니터링을 수행하고 있으며, 2013년부터는 도시지역 집중 모니터링을 수행 중이다. 이 사업에서는 매년 다른 도시를 선정하여 3~4개 지점에서 4계절 (계절당 7~10일 이상) 동안 HAPs를 모니터링하고 있다. 그러나 이와 같은 집중 모

니터링 사업에서도 측정지점을 선정하는 객관적인 절차가 마련되지 않았다.

본 연구진은 선행 연구를 통해, HAPs 모니터링을 위한 대도시 우선순위 측정지점 선정기법을 제안하였다 (Kwon *et al.*, 2017). 이 연구에서는 수도권 (서울, 인천, 경기)을 시범지역으로 선택하고, 해당 지역을 총 225개 격자 (7km×7km)로 나누어, 격자별 점수를 계산하였다. 총 15개 인자 (인구밀도, 자동차등록대수, 대기오염물질별 배출량, 주요 배출원)의 분포지도를 작성하였으며, 각 인자의 상위 30%에 해당하는 격자에 점수를 부여하고 격자별 총점을 산정하여 우선순위 측정지점을 제시하였다. 이 선행 연구는 GIS를 이용하여 대도시에서의 측정지점을 객관적으로 선정하는 방법을 마련한 것에 의의가 있다. 그러나 격자의 해상도가 낮으며, 입력자료 특성을 반영한 가중치를 고려하지 않았고, 고해상도 HAPs 모니터링 결과를 사용하지 못한 단점이 있다. 국외의 경우, 측정망의 상향식 선정기법 (US EPA, 2007), 도시대기측정망의 재선정 전략 (Tseng and Chang, 2001), 도로변대기측정망 선정을 위한 의사결정 (Kimbrough *et al.*, 2008) 등을 제안한 연구는 있으나, GIS 기반의 유해대기오염물질 측정지역 선정에 대한 연구는 부족하다.

본 연구에서는 선행 연구와 비교하여 공간해상도를 12.25배 증가시킨 격자 (2km×2km) 기반으로 서울시 GIS 자료를 활용하여 우선순위 측정지역을 선정하였다. 입력자료 특성을 고려하여 차등적인 가중치를 부여하였고, 입력자료의 다양한 조합과 시나리오를 마련하여 더욱 객관적이고 타당한 우선순위를 산정하였다. 또한, 다수 지점에 수동대기채취기 (Passive Air Sampler: PAS)를 설치하여 고해상도 모니터링 결과를 우선순위 산정의 입력자료로 활용하였다. 본 논문은 측정지역 선정 단계, 기초 입력자료, 격자별 점수 산정법 등을 자세히 기술하고 있으므로, 입력 변수와 가중치를 최적화하면 다른 측정망 (예: 도시대기측정망, 광화학대기오염물질측정망 등)에도 활용 가능하다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 대도시 우선순위 측정지역 선정 단계

본 연구에서는 선행 연구 (Kwon *et al.*, 2017)에서 정

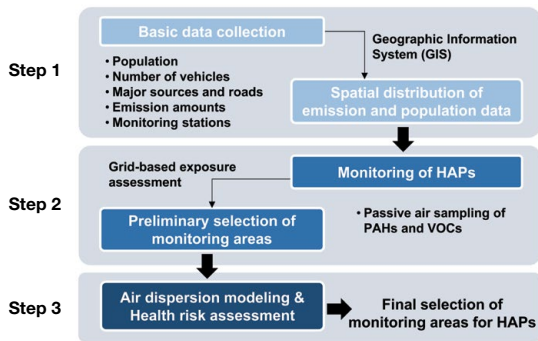


Fig. 1. Three steps for the selection of priority monitoring areas for HAPs in Seoul.

립한 대도시 우선순위 측정지역 선정기법을 기초로 하여, 서울시를 대상으로 세 단계의 우선순위 측정지역 선정법을 제안하였다(그림 1). 1단계에서는 인구, 대기오염물질 배출원, 배출량, 측정결과의 공간분포를 270개 격자(2 km × 2 km)에 할당하였고, 2단계에서는 PAS를 이용한 다환방향족탄화수소(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: PAHs)와 휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds: VOCs)의 현장 모니터링 자료를 추가하였다. 3단계에서는 대기확산모델(또는 화학수송모델) 결과와 인체 위해성평가 결과를 활용할 수 있다. 선행 연구(Kwon *et al.*, 2017)에서는 1단계까지 진행하였으며, 본 연구에서는 2단계까지 진행하였고, 향후 3단계를 반영한 연구를 진행할 예정이다. 한편, 지역에 따라 PAS 모니터링 자료가 없는 경우에는 1단계로만 우선순위 측정지역을 선정할 수 있고, 2단계를 생략하고 바로 3단계를 고려할 수도 있다.

## 2.2 서울시 기초자료 조사와 모니터링

서울시의 면적은 605.96 km<sup>2</sup>이며, 25개 구와 423개동에 인구 1,000만 명 이상이 거주한다(SMG, 2016). 대기오염물질 배출량(CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, TSP, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, VOCs, NH<sub>3</sub>) 총합은 경기도(551,114 tonne/y)가 가장 많으며, 충청남도(485,647 tonne/y), 경상북도(395,365 tonne/y), 전라남도(392,400 tonne/y), 경상남도(335,852 tonne/y), 울산(273,400 tonne/y), 서울(252,413 tonne/y) 순으로, 서울의 배출량은 중위권이다(NIER, 2015). 그러나 산업단지의 대기오염물질 배출량을 제외하고 면적을 고려하면 서울의 대기오염배출량은 상위권이다.

서울시의 우선순위 측정지역을 정량적으로 선정하기 위해서, 총 18개 인자를 배출(16개)과 인구(2개)로 나누어 격자별로 데이터베이스(DB)화하였다. 국가통계포털사이트(<http://www.kosis.kr>)에서 2015년 동별 자동차등록대수(승용차, 승합차, 화물차, 특수차, 이륜차)와 인구(전 연령 남자, 여자, 외국인 포함) 자료를 확보하였으며, 인구밀도를 계산하였다. 지역별 자동차등록대수가 실제 대기오염물질 배출량을 반영하기 어려운 경우가 있으므로 주요 도로(교통량 100,000 대/일 이상)에 대한 위치 자료를 확보하였으며, 전체 도로별 교통량 상세 자료를 고려할 수도 있다. 추가적으로 기타 주요 배출원(소각장, 공항, 역, 발전소, 터미널) 위치도 파악하였다.

배출 인자로는 2012년 대기정책지원시스템(Clean Air Policy Support System: CAPSS)의 일산화탄소(CO), 질소산화물(NO<sub>x</sub>), 부유성 먼지(PM<sub>10</sub>), VOCs 점오염원 배출량 자료를 활용하였다. 기준성 대기오염물질 중에서 CO와 NO<sub>x</sub>는 대표적인 연소산물로서 연소기원 HAPs를 반영할 수 있고, PM<sub>10</sub>은 PAHs와 중금속을 주로 축적하므로 배출인자로 선택되었다. CAPSS 자료의 경우, 점오염원만 고려하고 선·면오염원을 고려하지 않았는데, 주요 도로 위치, 자동차등록대수, 인구밀도 등이 선·면오염원을 반영할 수 있기 때문이다. 추가적으로 유해화학물질 배출을 고려하기 위해서 2014년 화학물질배출·이동량 정보시스템(Pollutant Release and Transfer Register: PRTR) 자료를 확보하였다(<http://ncis.nier.go.kr/triopen>). 서울시와 달리, 울산시와 같은 산업도시에는 다른 인자보다 PRTR 자료가 가장 큰 가중치를 부여할 수 있다. 또한, 측정망 농도 자료도 배출 인자로 고려하였다. 2014년 유해대기물질 측정망 평균 농도(7종 PAHs와 13종 VOCs), 대기중금속측정망 평균 농도(9종 중금속), 도시대기측정망 평균 농도(CO, NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>), PAS를 이용한 PAHs와 VOCs 모니터링 결과를 이용하였다.

PAS는 무게가 가볍고 가격이 저렴하므로 다수의 지점에 설치하여 해당 오염물질의 지리적 분포 특성 확인에 유용하다(Choi, 2013). 그러므로 HAPs의 공간분포에 근거한 우선순위 측정지역 선정을 위해, PAS를 이용하여 PAHs와 VOCs를 모니터링하였다. 서울시 도시대기측정망을 중심으로 36개 지점(도심 26개, 도로변 4개, 배경 6개)별로 4개의 PAS(PAHs용 2개와

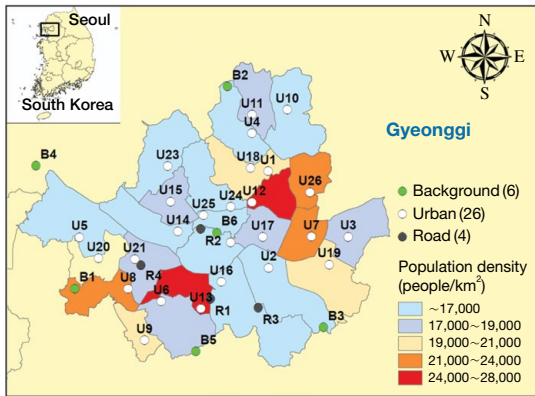


Fig. 2. Locations of passive air sampling (26 urban, 4 road, and 6 background sites) on a population density map of Seoul, South Korea.

VOCs용 2개)를 여름철(2016.08.06~09.06)과 겨울철(2017.01.05~02.07) 각각 한 달 동안 설치하였다(그림 2). PAHs 모니터링을 위해 사용한 흡착제는 폴리우레탄폼(PolyUrethan Foam: PUF)이며, 속슬렛(Soxhlet)으로 용매추출 후 실리카겔 컬럼으로 정제하였으며, 기체 크로마토그래프/질량분석기(Gas chromatograph/mass spectrometer: GC/MS)로 분석하였다. 분석대상물질은 US EPA가 우선관리대상물질로 선정한 16종 PAHs이었다. VOCs의 경우, 활성탄을 흡착제로 사용하였으며, 이황화탄소(Carbon disulfide: CS<sub>2</sub>)와 초음파세척기로 추출 후, GC/MS로 58종 VOCs를 분석하였다. 본 연구에서는 두 종류 물질의 공간분포에 관한 구체적인 해석을 제시하지 않았으며, GIS를 이용한 측정지역 선정의 입력자료로만 활용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 서울시 기초자료 조사결과

측정지역 선정 절차의 첫 단계로서, GIS 소프트웨어(ArcGIS 10.4.1, ESRI Inc.)의 반비례 거리 가중법(Inverse Distance Weighted: IDW)으로 등고선 지도를 작성하였다(그림 3a). PAHs와 VOCs의 PAS 모니터링 결과에 대해서는 총 농도와 발암성 물질의 농도를 별도로 나타내었다(그림 3b).

CO, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub> 배출량은 모두 마포구에서 가장 많

았으며, VOCs 배출량은 강서구와 은평구에서 많았다. 도시지역 특성상, 서울에서는 PRTR에서 조사한 유해 화학물질 대부분이 인쇄 관련 업체, 조각장, 발전소에서 배출되었으며, 종로구에서 가장 많은 배출량을 보였다. 반면, 도시대기측정망의 CO, NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> 농도는 금천구, 동작구, 노원구 주변에서 높게 나타났다. 즉, 기준성 대기오염물질의 배출량 분포와 실제 농도 분포가 달랐다. 이러한 차이는 기상현상으로 인한 대기오염물질의 확산과 선·면오염원의 영향으로 추정된다. 유해 대기물질측정망과 대기중금속측정망의 PAHs, VOCs, 중금속 농도는 각각 다른 분포 경향을 보였는데, 세 물질의 주요 오염원이 다르며, 두 측정망의 측정소 위치가 다르기 때문이다.

일평균 교통량은 남부순환로에서 가장 높았으며, 동부간선도로, 천호대로, 올림픽대로, 자유로, 경인로 순으로 나타났으며, 총 21개의 도로를 지도에 표시하였다. 주요 배출원은 조각장(5개소), 공항(1개소), 역(1개소), 발전소(2개소), 터미널(3개소)을 지도에 나타내었다. 자동차등록대수는 영등포구 여의도동에서 가장 많았으며, 강남구 역산 1동과 대치 4동, 강서구 가양 1동, 양천구 신정 3동 순으로 나타났다. 인구는 양천구 신정 3동에서 가장 많았으며, 은평구 진관동, 강서구 화곡 1동, 강동구 길동, 은평구 역전동 순으로 나타났다. 반면, 인구밀도는 노원구 중계 1동이 가장 높았으며, 강서구 화곡 8동, 도봉구 창 2동, 성북구 길음 1동과 단암 2동 순이었다. 양천구의 자동차등록대수와 인구 수는 모두 높은 순위로 나타났다.

#### 3.2 서울시 우선순위 측정지역 선정 방법

우선순위 측정지역을 선정하기 위하여 (1) 서울시 지도를 격자로 구분 후 번호를 부여하고, (2) 인자별 등고선 지도를 작성하여 개별 격자의 배출·인구 인자별 점수를 계산하고, (3) 배출과 인구 시나리오에 따른 상위 격자 선별 과정을 거쳤다. 서울시 면적(605.96 km<sup>2</sup>)을 고려하여 격자 크기를 2 km×2 km로 설정하였다(총 270개 격자). 개별 격자의 점수 합산을 위해, 인자별로 다섯 개 구간의 색상으로 구분된 등고선 지도를 작성하고 저농도 구간에서 고농도 구간까지 각각 1~5 점을 할당하였다. 즉, 개별 인자의 수치를 모두 표준화하였다. 한 격자에서 농도 구간이 중복된 경우(여러 색상이 나타날 경우), 색상 면적의 비율에 따라 점수를

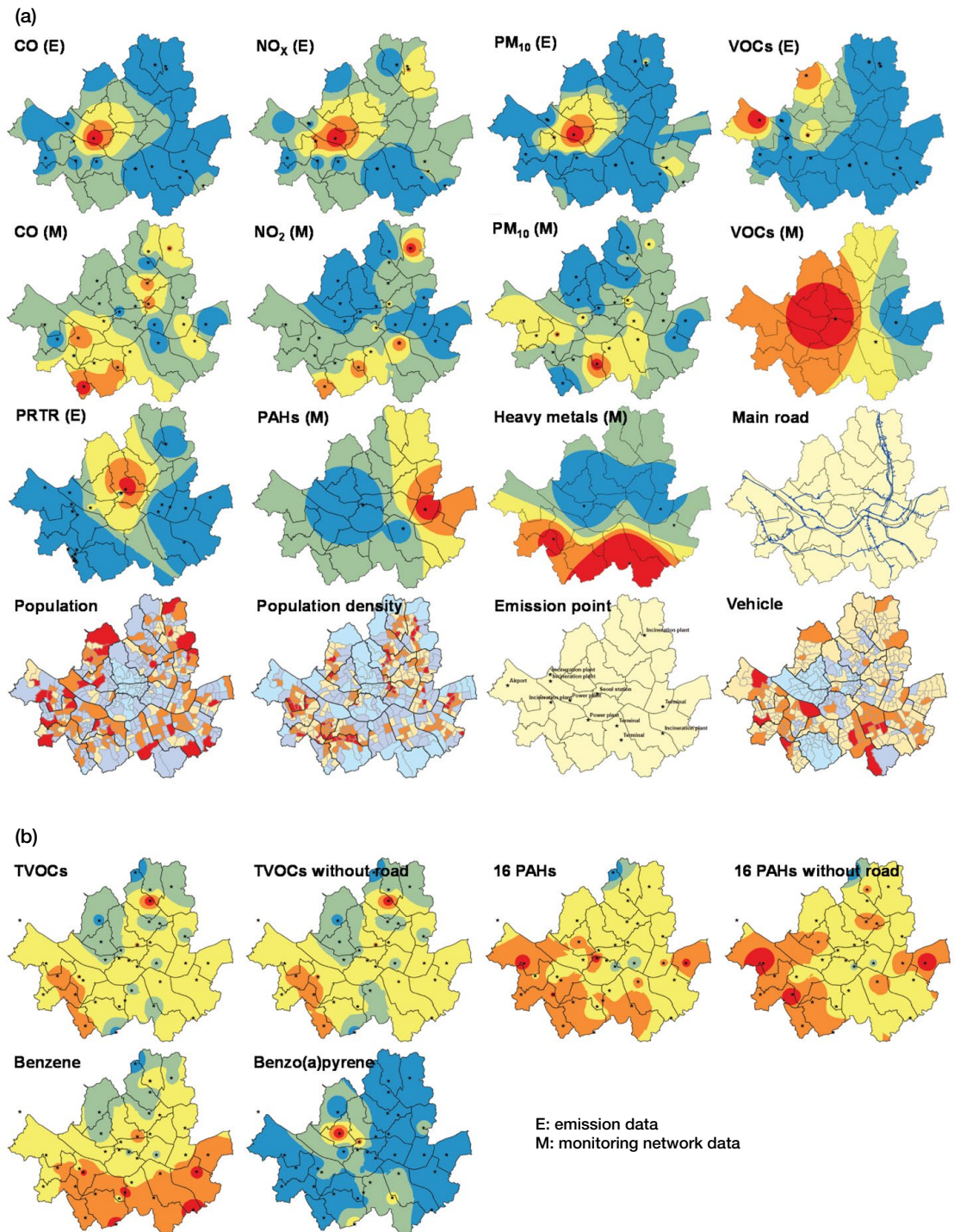


Fig. 3. Spatial distributions of parameters for the selection of priority monitoring areas: (a) emission and monitoring network data and (b) passive air sampling data.

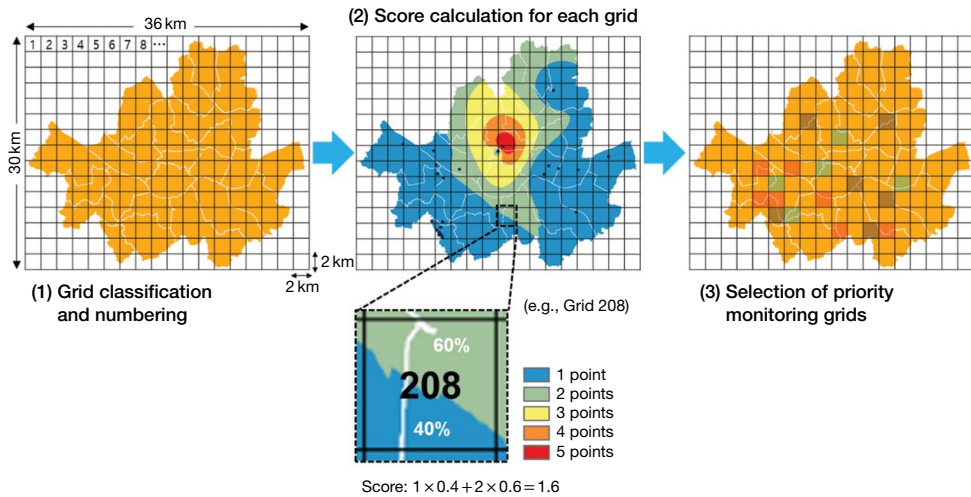


Fig. 4. Procedure for the selection of priority monitoring areas of HAPs and a method for the score calculation of each grid.

배분하였다. 그림 4에서 208번 격자는 파란색(1점)이 40%를 차지하고 청록색(2점)이 60%를 차지하므로 1.6점 ( $= 1 \times 0.4 + 2 \times 0.6$ )으로 계산된다. 이러한 방법으로 모든 격자와 배출·인구 인자에 대한 점수를 계산하였다. 단, 주요 도로와 배출원이 위치한 격자에는 3점을 추가하였다.

배출 인자를 인체 노출과의 관련성(또는 노출량 산정에 대한 신뢰성)에 따라, 크게 네 가지(배출원, 배출량, 측정망 자료, PAS 모니터링 자료)로 분류하여 가중치를 차등적으로 곱하고 격자별로 합산하였다. 주요 도로, 배출원, 자동차등록대수에는 가중치 1을, CO, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub>, VOCs, 유해화학물질(PRTR) 배출량에는 가중치 2를, 기존 측정망 모니터링 결과(CO, NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, PAHs, VOCs, 중금속)에는 가중치 3을, PAS 모니터링 결과(PAHs와 VOCs)에는 가중치 4를 부여하였다. 향후, PAS 모니터링이나 대기확산모델링 결과로 산출한 인체 위해성평가 결과에 가중치 5를 부여할 수 있다. 한편, PAS 모니터링 결과에 대해서 세 개의 조합을 고려하여 PAHs와 VOCs의 영향을 더욱 다양하게 반영하였다. 조합 1에서는 모든 분석대상 HAPs의 영향을 적용하기 위해,  $\sum_{16}$  PAHs와  $\sum_{58}$  VOCs의 농도 분포를 고려하였다. 조합 2에서는 자동차 배기가스의 영향을 줄이고 지역별 특성을 고려하기 위해, 시료채취지점 중 도로변(4개 지점)을 제외한  $\sum_{16}$  PAHs와  $\sum_{58}$  VOCs

농도 자료를 이용하였다. 조합 3에서는 PAHs와 VOCs 중에서 대표적인 발암물질인 벤조(a)피렌과 벤젠을 고려하였다(IARC, 2016). 인구 인자에는 별도로 가중치를 부여하지 않고, 인구수와 인구밀도의 표준화 수치를 합산하였다.

각 격자에 대해 인자별 점수를 계산 후, 고농도 노출 인구의 중요성을 고려하기 위하여 배출과 인구 인자의 비율을 다르게 적용한 네 개의 시나리오를 설정하였다. 시나리오 1은 배출과 인구 인자를 동일한 비율로 계산하였으며(50:50), 시나리오 2(60:40), 시나리오 3(70:30), 시나리오 4(80:20)로 배출 인자의 비율을 증가시켰다. 최종적으로 이러한 시나리오에서 중복되는 상위 5% 격자를 확인하였다(그림 5).

### 3.3 우선순위 측정지역 선정 결과

PAS 모니터링 결과의 조합 1~3에 대한 시나리오별 총합이 상위 5%인 격자(14개)를 나열하였다(표 1). 이 표에서 상위 5%에 선정된 격자일지라도, 배출과 인구 인자가 각각 상위 5% 이내에 포함되지 않으면 측정지점 선정 우선순위에서 배제하였다. 예를 들어, 조합 1의 148번 격자는 시나리오 1~4에서 모두 상위 1%에 속하는 고득점을 받았지만, 배출 인자와 인구 인자가 각각 5%에 포함되지 않으므로, 3순위 격자로 분류된다. 반면, 조합 2의 149번 격자는 148번 또는 206번 격

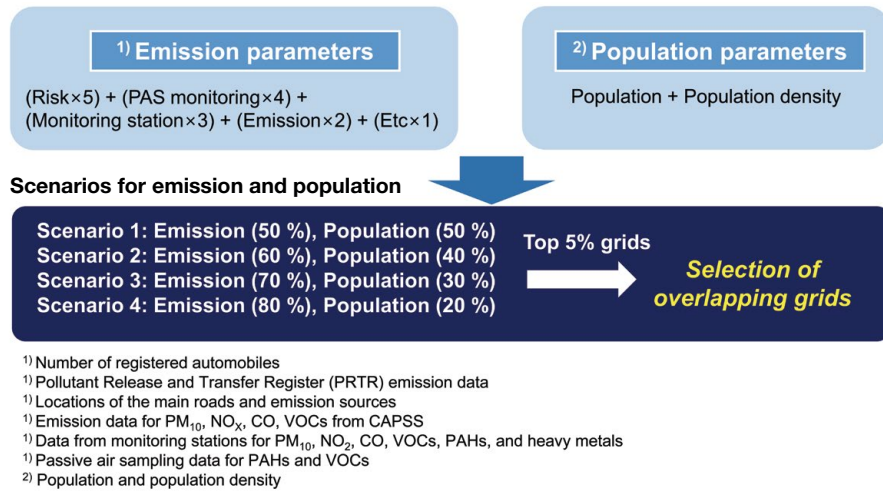


Fig. 5. List of emission and population parameters consisting of four scenarios for the selection of overlapping grids for priority monitoring.

Table 1. Top 5% grids of three combinations of each scenario. Priority grids for monitoring of HAPs are shown in bold. These selected grids are within 5% of emission and population parameters, respectively.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Combination 1														
Scenario 1	148	166	<b>204</b>	206	<b>167</b>	<b>207</b>	223	<b>149</b>	186	97	185	205	202	67
Scenario 2	148	<b>204</b>	166	206	<b>167</b>	<b>207</b>	<b>149</b>	223	186	185	205	153	168	202
Scenario 3	<b>204</b>	148	<b>167</b>	166	<b>207</b>	206	<b>149</b>	223	186	185	153	168	205	202
Scenario 4	<b>204</b>	<b>167</b>	148	<b>207</b>	<b>149</b>	166	168	206	153	223	185	186	205	202
Combination 2														
Scenario 1	148	166	<b>204</b>	206	<b>167</b>	<b>207</b>	223	186	<b>149</b>	97	185	205	202	67
Scenario 2	148	<b>204</b>	166	<b>167</b>	206	<b>207</b>	<b>149</b>	223	186	185	205	202	67	188
Scenario 3	<b>204</b>	148	<b>167</b>	166	<b>207</b>	206	<b>149</b>	186	223	185	205	153	202	67
Scenario 4	<b>204</b>	148	<b>167</b>	<b>149</b>	<b>207</b>	166	186	206	223	185	205	153	202	184
Combination 3														
Scenario 1	148	206	<b>207</b>	166	<b>204</b>	167	223	97	186	149	205	153	67	185
Scenario 2	<b>207</b>	148	206	<b>204</b>	166	167	223	186	149	153	97	205	168	185
Scenario 3	<b>207</b>	<b>204</b>	206	167	148	223	166	153	168	149	186	205	133	185
Scenario 4	<b>207</b>	<b>204</b>	168	167	153	206	223	149	148	133	186	205	134	209

자보다 총합 순위는 낮지만, 배출과 인구 인자가 모두 5% 이내에 있으므로 2순위 격자로 분류된다. 이러한 다양한 구조의 시나리오와 조합을 통해, 단일 인자의 영향으로 우선순위 격자가 선정되는 것을 방지하고 더욱 합리적으로 우선순위 측정지역을 선정하였다.

조합별 · 시나리오별 상위 5% 격자 중에서 조합 1의 149번, 167번, 204번, 207번 격자, 조합 2의 149번, 167번, 204번, 207번 격자, 조합 3의 204번과 207번 격자

가 각각 배출과 인구 인자 상위 5%에 해당하였다(그림 6). 그중 모든 조합에서 중복되는 204번과 207번 격자를 1순위 격자로 선정하였으며, 조합 1과 2의 149번과 167번 격자를 2순위 격자로 선정하였다. 다음으로 배출과 인구 인자가 각각 상위 5%에 포함되지 않지만, 모든 조합의 시나리오에서 총합이 상위 5%로 나타나는 148번, 186번, 205번, 206번, 223번 격자를 3순위로 선정하였다. 1순위 격자는 동작구와 구로구, 2순위는

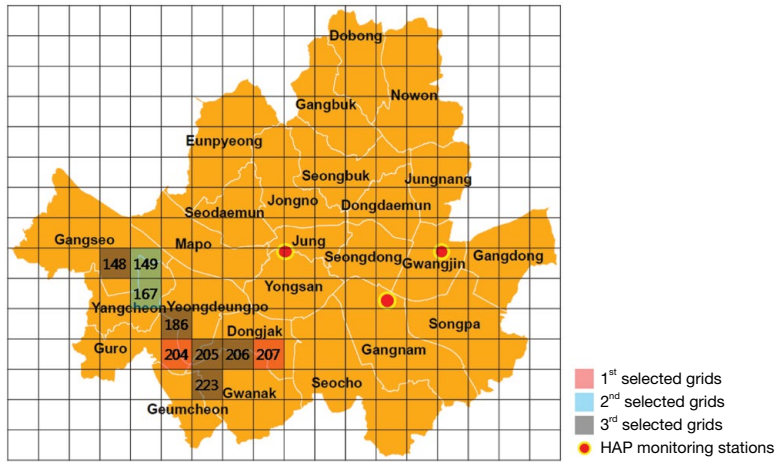


Fig. 6. Selected priority grids (red: 204 and 207, blue: 149 and 167, and gray: 148, 186, 205, 206, and 223) for hazardous air pollutants. Three HAP monitoring stations of the Ministry of Environment (red circles) are also shown.

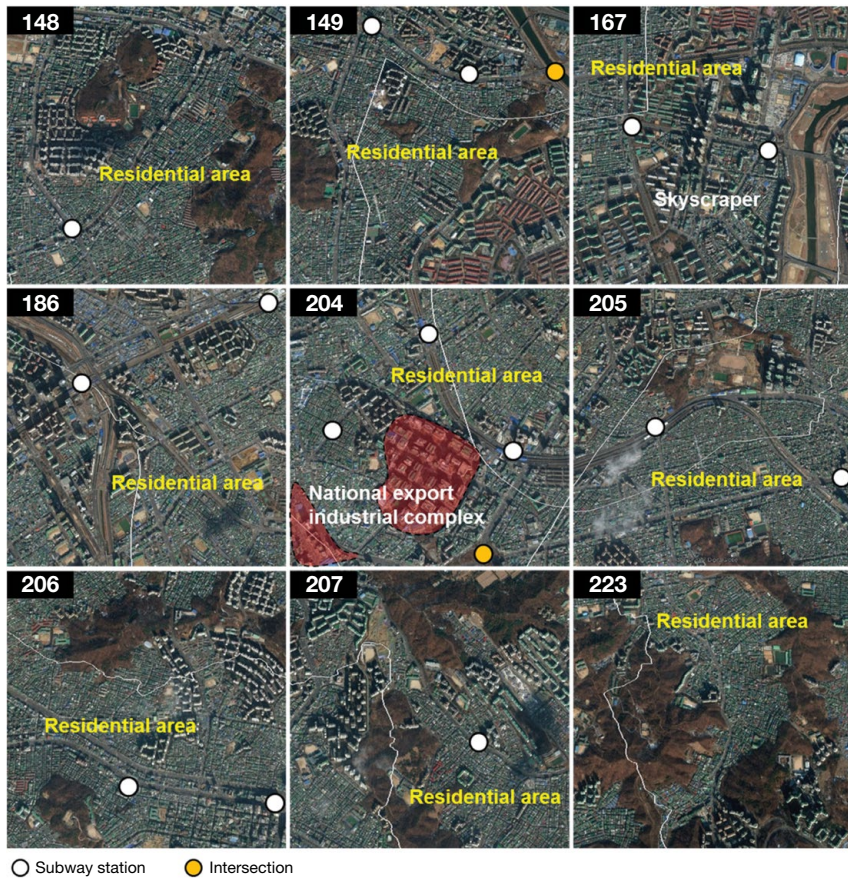


Fig. 7. Satellite images of selected nine grids. Locations of residential areas, skyscrapers, a national export industrial complex, subway stations, and intersections are indicated.



강서구와 양천구, 3순위는 강서구, 영등포구, 구로구, 동작구, 관악구, 금천구에 위치하였다. 우선순위로 선정된 모든 격자가 고층빌딩과 넓은 주거지역을 가지고 있으며, 223번 격자를 제외한 모든 격자에는 1~3개의 지하철역이 있다. 그중 149번 격자에는 양천구의 올림픽대로와 연결되는 대형 교차로, 204번 격자에는 시흥 IC와 한국수출산업단지, 167번 격자에는 로테오거리와 백화점 등 다양한 쇼핑센터가 위치하고 있다(그림 7).

우선순위 측정지역 9개 모두 한강 이남 서쪽에 위치하고 있으며, 전반적으로 인구밀도가 높고 자동차등록 대수가 많으며, PAHs와 VOCs의 농도가 비교적 높았다. 이러한 오염 현상은 서울시 국지적인 영향일 수도 있으며, 인근의 시화·반월산업단지와 중국과 북한으로부터의 장거리 이동 영향 가능성도 있다(Kim *et al.*, 2013). 이에 대해서는 현재 추가 연구를 진행 중이다. 기존 서울시 소재 유해대기물질측정소들은 본 연구에서 선정한 지역과 중복되지 않으므로, 본 연구결과는 서울시 측정소 확충에 유용하게 사용될 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 선행 연구에서 제시한 GIS를 이용한 우선순위 HAPs 측정소 선정기법을 개선하여 서울시에 적용하였다. 기초자료를 배출 인자와 인구 인자로 구분하여 등고선 지도를 작성하고, 격자별로 각 인자를 표준화하여 1~5점을 할당하였다. 격자별로 총점 계산 시, HAPs 노출 추정에 대한 신뢰도를 고려하여 인자별로 가중치를 곱하였다. PAS 모니터링 결과에 대해서는 총 농도 분포와 발암성 물질 분포를 별도로 고려하였다. 최종적으로 배출과 인구 인자 비중에 따른 시나리오를 고려하여 여러 조건에서 중복되는 격자를 우선순위 측정지역으로 선정하였다.

선행 연구와 비교하여 본 연구에서는 인자별 가중치 부여, 배출·인구 시나리오 적용, 다수 지점에서 PAS를 이용한 모니터링 자료를 추가한 것에 차별성이 있으며, PAS 결과와 대기확산모델링에 기반한 인체 위해성평가를 우선순위 측정지역 선정에 고려할 수 있는 토대를 마련하였다. 본 연구에서는 중금속과 기타 HAPs에 대한 PAS 모니터링을 실시하지 않았으나, 향후 다양한 모니터링을 통해 실측자료 중심으로 측정지

점 선정이 가능할 것이다. 한편, 본 연구방법을 서울시 아닌 다른 지역에 적용하거나 대상오염물질 종류가 다른 경우에는 입력변수 선정과 가중치 부여 방식을 최적화해야 하며, 전문가 협의 등을 통하여 더욱 객관적이고 합리적인 자료를 사용하는 것이 바람직하다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국환경산업기술원 환경정책기반 공공 기술개발사업(2016000160001, 2016000160002), 한국환경산업기술원 화학사고 대응 환경기술개발사업(2017001960001), 한국연구재단 중견과제(2017R1A2B4003229)의 지원으로 수행되었습니다.

#### References

- Choi, S.-D. (2013) Calculation method for the concentration of persistent organic pollutants (POPs) collected by passive air samplers, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 29(2), 217-227. (in Korean with English abstract)
- International Agency for Research on Cancer (IARC) (2016) Agents classified by the IARC monographs, [http://monographs.iarc.fr/ENG/Classification/List\\_of\\_Classifications.pdf](http://monographs.iarc.fr/ENG/Classification/List_of_Classifications.pdf)
- Kim, I.S., Lee, J.Y., Kim, Y.P. (2013) Impact of polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) emissions from North Korea to the air quality in the Seoul Metropolitan Area, South Korea, *Atmospheric Environment*, 70, 159-165.
- Kim, S.-J., Kwon, H.-O., Hwang, Y.S., Choi, S.-D. (2016) Selection of priority chemicals and areas for the response to chemical accidents in national industrial complexes, *Journal of the Korean Society for Environmental Analysis*, 19(1), 24-35. (in Korean with English abstract)
- Kimbrough, S., Vallero, D., Shores, R., Vette, A., Black, K., Martinez, V. (2008) Multi-criteria decision analysis for the selection of a near road ambient air monitoring site for the measurement of mobile source air toxics, *Transportation Research Part D*, 13(8), 505-515.
- Kwon, H.-O., Kim, S.-J., Kim, Y.P., Kim, S.-K., Hong, J.-H.,

- Choi, S.-D. (2017) Suggestions on the selection method of priority monitoring sites for hazardous air pollutants in megacities, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(6), 544-553. (in Korean with English abstract)
- Lee, J.-B., Lee, C.-K., Choi, S.-W. (2010) The appropriacy evaluation of automatic air pollution monitoring by population and air pollutant generation rate, *Journal of Nakdong River Environmental Research Institute*, 14(1), 301-319. (in Korean with English abstract)
- Ministry of Environment (MOE) (2016) Installation and Operation Guidelines for Air Pollution Monitoring Networks.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2015) National Air Pollutants Emission in 2013.
- Seoul Metropolitan Government (SMG) (2016) 2015 Environment White Paper - Environment of Seoul.
- Tseng, C.C., Chang, N.-B. (2001) Assessing relocation strategies of urban air quality monitoring stations by GA-based compromise programming, *Environmental International*, 26(7-8), 523-541.
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2007) Ambient Air Monitoring Network Assessment Guidance.
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2017) Initial List of Hazardous Air Pollutants with Modifications, <https://www.epa.gov/haps/initial-list-hazardous-air-pollutants-modifications>
- Woo, N.Y., Sik, K.J., Gil, C.B. (2005) The allocation analysis of TMS using GIS, *Journal of the Korean Society for Geo-spatial Information Science*, 13(1), 81-87. (in Korean with English abstract)
- Yoo, E.-C., Park, O.-H. (2007) Optimization of air quality monitoring networks in Busan using a GIS-based decision support system, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 23(5), 526-538. (in Korean with English abstract)